

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Svařitelnost jemnozrnných mikrolegovaných ocelí

Weldability of Fine-grained Microalloyed Steels

Student:

Bc. Sylvie Kopaňáková

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.

Ostrava 2010

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Sylvie Kopaňáková**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Svařitelnost jemnozrných mikrolegovaných ocelí**
Weldability of Fine-grained Microalloyed Steels

Zásady pro vypracování:

Proveďte studii svařitelnosti vysokopevných ocelí
Navrhněte možné technologie svařování těchto ocelí
Pro zvolené technologie navrhněte přídatné materiály
Zpracujte detailní technologický postup pro zvolené metody svařování
Ověřte základní mechanické vlastnosti svarových spojů
Proveďte diskuzi dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír; HAJDÍK Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. Vyd. 1. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2005. 136 s. ISBN 80-248-0870-6.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

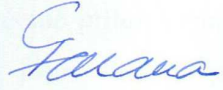
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Drahomír Schwarz, CSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010




prof. Ing. Jiří Hrubý, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5. 2010

.....
Sylvie Kopcová

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :.....*18.5. 2010*.....

Sylvie Kopaňáková
.....
podpis

Bc. Sylvie Kopaňáková
Výstavní 335
739 31 ŘEPIŠTĚ

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOPAŇÁKOVÁ, S. *Svařitelnost jemnozrnných mikrolegovaných ocelí. Diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2010, 55 s. Vedoucí práce: Schwarz, D.

Diplomová práce se zabývá studiem svařitelnosti vysokopevných jemnozrnných mikrolegovaných ocelí.

Cílem práce je navržení vhodných technologií svařování a vhodných přídatných materiálů pro vybraný základní materiál. V experimentální části práce se zabývám ověřením základních mechanických vlastností svarových spojů a strukturních vlastností svarových spojů, kde v závěru uvádím zhodnocení výsledků daných zkoušek.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KOPAŇÁKOVÁ, S. *Weldability of Fine-grained Microalloyed Steels. Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2010, 55 p. Thesis head: Schwarz, D.

The master thesis is concerned with the study of high tenacious weldability of fine-grained microalloyed steels.

The aim of this work is to suggest efficient technologies of welding and efficient additional materials for the chosen basic material. In the experimental part of the work I deal with verification of basic mechanical qualities of weld joints and structure dualities of weld joints. As a conclusion, I state an evaluation of results of these particular tests.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	2
ÚVOD.....	9
1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL.....	10
2 SVAŘITELNOST JEMNOZRNÝCH MIKROLEGOVANÝCH OCELÍ.....	18
3 METODY SVAŘOVÁNÍ JEMNOZRNÝCH MIKROLEGOVANÝCH OCELÍ.....	14
3.1 Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (135).....	19
3.1.1 Použití metody pro dané materiály	19
3.1.2 Zdroje svařování a příslušenství	20
3.2 Obloukové svařování obalenou elektrodou (111).....	16
4 VOLBA PŘÍDAVNÝCH MATERIÁLŮ PRO JEDNOTLIVÉ METODY SVAŘOVÁNÍ A VYBRANÉ ZÁKLADNÍ MATERIÁLY.....	17
4.1 Přídavné materiály	22
4.2 Předehřev při svařování	24
4.3 Tepelné zpracování po svařování	28
5 NÁVRH METODIKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ.....	30
5.1 Svařování zkušebních vzorků metodou 135	31
5.2 Svařování zkušebních vzorků metodou 111	34
5.3 Vyhodnocení zkoušek.....	36
6 DISKUZE VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	56
7 ZÁVĚR	58
8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	59

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Znak	Veličina	Jednotka
ČSN	Česká státní norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
ISO	Mezinárodní norma	[-]
AWS	American welding society	[-]
HB	Tvrдость podle Brinella	[-]
Cr	Chrom	[-]
Ni	Nikl	[-]
Al	Hliník	[-]
Ti	Titan	[-]
Nb	Niob	[-]
V	Vanad	[-]
Ar	Argon	[-]
Mn	Mangan	[-]
Mo	Molybden	[-]
TiC	Karbid titanu	[-]
AlN	Niob hliníku	[-]
NbC	Karbid niobu	[-]
V ₄ C ₃	Karbid vanadu	[-]
Fe ₄ N	Nitrid železa	[-]
Fe ₁₆ N ₂	Nitrid železa	[-]
CO ₂	Oxid uhličitý	[-]
m	Hmotnost	[g]
l	Délka	[mm]
p	Tlak, napětí	[MPa]
t	Teplota	[°C]
V	Objem	[l]
Q	Teplo	[J]
I	Proud	[A]
U	Napětí	[V]
v	Rychlost	[m.s ⁻¹]

Znak	Veličina	Jednotka
k	Koeficient tepelné účinnosti	[-]
CE	Uhlíkový ekvivalent	[%]

ÚVOD

V současné době s rostoucími požadavky na zvyšování užitečných vlastností svařovaných konstrukcí dochází ke stále většímu použití konstrukčních ocelí s vyšší úrovní meze kluzu a pevnosti. Vysokopevnostní jemnozrnné mikrolegované oceli jsou v dnešní době standardními konstrukčními materiály. Vyrábějí se jako zušlechtěné nebo termomechanicky zpracované v kombinaci s vhodným chemickým složením. Tyto oceli mají vysokou mez kluzu, až 1100 MPa, vývoj těchto materiálů se však posouvá k ocelím s ještě vyššími mechanickými parametry. Nároky na svařování a dodržení technologických parametrů během svařování jsou u těchto ocelí velmi přísné a musí se přesně dodržovat, aby byl výsledný svarový spoj vyhovující.

V diplomové práci se zabývám studiem problematiky svařitelnosti jemnozrnných mikrolegovaných ocelí. Cílem je stanovit vhodné metody svařování, přídavné materiály a ověřit základní mechanické vlastnosti svarových spojů tak, aby se zajistila vyhovující jakost svarových spojů a zároveň se zachovaly technologické vlastnosti základního materiálu.

1 ZÁKLADNÍ MATERIÁL

Při dolegování konstrukčních uhlíkových ocelí malými obsahy prvků jako Al, Ti, Nb a V, vzniká jemnozrnná struktura, tyto prvky zvyšují pevnostní vlastnosti materiálu, proto tyto materiály nazýváme **jemnozrnné oceli**.

Polotovary z jemnozrnných ocelí se vyrábějí nejčastěji řízeným válcováním v kombinaci s tepelným zpracováním, které zvýrazňuje vliv mikrolegur (Al, Ti, Nb a V) na vlastnosti materiálu. Proto také někdy označujeme materiály tohoto typu jako **mikrolegované jemnozrnné oceli**. Obsahy mikrolegujících prvků jsou obvykle limitovány: Al min 0,015 hm. %, Ti max. 0,15 hm. %, V max. 0,1 hm. % a Nb max. 0,04 hm. %. [4].

Tyto uvedené prvky vytvářejí spolu s uhlíkem a dusíkem karbidy, nitridy nebo karbonitridy. Například titan tvoří karbid TiC, hliník tvoří nitrid AlN, niob vytváří karbid NbC, nebo karbonitrid Nb (C,N) a vanad karbid V_4C_3 nebo karbonitrid V (C,N).

Precipitace těchto částic je příznivá z těchto hledisek:

1. Přítomnost precipitátů o velikosti do cca 50nm v mikrostruktuře oceli brání migraci hranic zrn při rekrystalizaci a tím i hrubnutí zrna.
2. Vazba uhlíku na karbidy a karbonitridy snižuje uhlíkový ekvivalent a zlepšuje svařitelnost oceli.
3. Formou precipitačního zpevnění zvyšují mez kluzu a mez pevnosti oceli.
4. Precipitáty mikrolegujících prvků váží i část intersticiálního dusíku. Pravděpodobnost vzniku nitridů železa Fe_4N , $Fe_{16}N_2$ způsobujících stárnutí oceli je proto minimální. Materiál nestárne.

Při řízeném válcování se růst zrn zabraňuje způsoby jako: precipitáty Nb a Mo snižují kinetiku rekrystalizace austenitu během deformace, a precipitáty Al a Ti brání růstu zrn při rekrystalizaci. Oba tyto způsoby se v praxi používají. Růstu zrn při rekrystalizaci brání také snížená doválcovací teplota (600 až 700°C), která se používá při výrobě polotovarů z mikrolegovaných jemnozrnných ocelí. [4]

Tyto jemnozrnné mikrolegované oceli jsou označeny obchodním názvem Weldox a Hardox, jsou to konstrukční vysokopevné ořezuvzdorné oceli s mezemi kluzu od 380 do 960 MPa a tvrdostí 400 – 600 HVB. Dosahují daného pevnostního stupně při zachování co nejlepší svařitelnosti. Zásadní rozdíl v mechanických vlastnostech mezi konstrukční ocelí 11 523 a vysokopevnými ocelmi je zejména v mezi kluzu a mezi pevnosti.

Dnes se vysokopevnostní oceli používají hlavně z několika důvodů. Jedním z nich je, že existuje omezení hmotnosti výrobku z hlediska jeho dopravy, manipulace, legislativních předpisů, ale kladou se nároky i na bezpečnost, odolnost proti zatížení a nosnost. Dalším důvodem je, že snížením hmotnosti dosáhneme zvýšení kapacity zařízení (např. mobilní jeřáby, části podvozků některých nákladních automobilů, apod.).

Ořezuvzdorná ocel Hardox splňuje požadavky na odolnost vůči opotřebení – ořezu. Tyto požadavky splňuje díky kombinaci vysoké tvrdosti, pevnosti a dobré houževnatosti. Vysoká odolnost proti opotřebení zvyšuje životnost komponentů např. karosérií výklopných vozů, korečků rýpadel, skluzů, koreb a jiných nástaveb nákladních vozů. Tvrdost tohoto plechu se dosahuje účinným kalením ve vodě nebo v oleji. Díky tomu má ocel vysokou tvrdost i přesto, že v oceli je málo legujících prvků.

Weldox 700 - S 690 QL

V tabulkách 1, 2 a 3 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti oceli S 690 QL s firemním označením Weldox 700, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

Ocel Weldox 700 je konstrukční vysokopevný plech s mezí kluzu 700 MPa, který má v tloušťce 20 mm stejnou svařitelnost jako ocel 11 523.

C	Si	Mn	P	S	B	Nb	Cr
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,16	0,5	1,7	0,025	0,015	0,005	0,05	0,7
V	Cu	Ti	Al	Mo	Ni	N	
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	
0,1	0,3	0,04	0,015	0,07	2	0,015	

Tab. 1. Chemické složení

R_{p0,2}	R_m	A	KV (-40°C)
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
700	780 - 930	14	27

Tab. 2. Mechanické vlastnosti

tloušťka	CE
[mm]	[%]
t-7	0,56
7,1-20	0,41
20,1-45	0,46
45,1-102	0,56

Tab. 3. Uhlíkový ekvivalent**Weldox 900 - S 890 QL**

V tabulkách 4, 5 a 6 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti oceli S 890 QL s firemním označením Weldox 900, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

C	Si	Mn	P	S	B	Nb	Cr
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,2	0,5	1,6	0,02	0,01	0,005	0,04	0,7
V	Cu	Ti	Al	Mo	Ni	N	
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	
0,06	0,3	0,04	0,018	0,7	2	0,015	

Tab. 4. Chemické složení

R_{p0,2}	R_m	A	KV (-40°C)
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
900	940 - 1100	12	27

Tab. 5. Mechanické vlastnosti

tloušťka	CE
[mm]	[%]
5 – 80	0,56

Tab. 6. Uhlíkový ekvivalent**Weldox 960 – S 960 QL**

V tabulkách 7, 8 a 9 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti oceli S 960 QL s firemním označením Weldox 960, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

C	Si	Mn	P	S	B	Nb	Cr
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,2	0,5	1,6	0,02	0,01	0,005	0,04	0,7
V	Cu	Ti	Al	Mo	Ni	N	
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	
0,06	0,3	0,04	0,018	0,7	2	0,015	

Tab. 7. Chemické složení

R _{p0,2}	R _m	A	KV (-40°C)
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
960	980 - 1150	12	27

Tab. 8. Mechanické vlastnosti

tloušťka	CE
[mm]	[%]
4 -13	0,56
13,1-50	0,64

Tab. 9. Uhlíkový ekvivalent

Weldox 1100 – S1100 QL

V tabulkách 10, 11 a 12 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti oceli S 1100 QL s firemním označením Weldox 1100, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

C	Si	Mn	P	S	B	Nb	Cr
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,21	0,5	1,4	0,02	0,01	0,005	0,04	0,8
V	Cu	Ti	Al	Mo	Ni	N	
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	
0,08	0,3	0,02	0,02	0,07	3	0,015	

Tab. 10. Chemické složení

R_{p0,2}	R_m	A	KV (-40°C)
[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
1100	1200-1500	10	27

Tab. 11. Mechanické vlastnosti

tloušťka	CE
[mm]	[%]
5 - 25	0,7

Tab. 12. Uhlíkový ekvivalent**Hardox 400**

V tabulkách 13, 14 a 15 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti vysokopevnostní ořezuvzdorné oceli s firemním označením Hardox 400, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

Vzhledem k vysoké úrovni houževnatosti a dobré svařitelnosti této oceli se často používá jako ořezuvzdorný a konstrukční plech současně.

C	Si	Mn	P	S	B	Mo	Cr	Ni
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,14	0,7	1,6	0,025	0,01	0,004	0,25	0,5	0,25

Tab. 13. Chemické složení tl. 10-20 mm

Tvrđost	Re	Rm	A	KV (-40°C)
HVB	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
370-430	1000	1250	10	45

Tab. 14. Mechanické vlastnosti tl. 10-20 mm

tloušťka	CE
[mm]	[%]
4 - 10	0,33
10 - 20	0,37
20 - 32	0,48
32 - 51	0,58

Tab. 15. Uhlíkový ekvivalent**Hardox 450**

V tabulkách 16, 17 a 18 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti vysokopevnostní ořřuvzdorné oceli s firemním označením Hardox 450, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

C	Si	Mn	P	S	B	Mo	Cr	Ni
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,21	0,7	1,6	0,025	0,01	0,004	0,25	0,5	0,25

Tab. 16. Chemické složení tl. 8-20 mm

Tvrđost	Re	Rm	A	KV (-40°C)
HVB	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[J]
425-475	1200	1400	10	40

Tab. 17. Mechanické vlastnosti tl. 20 mm

tloušťka	CE
[mm]	[%]
3 – 8	0,30
8 - 20	0,34
20 - 40	0,37
40 - 50	0,36

Tab. 18. Uhlíkový ekvivalent**Hardox 500**

V tabulkách 19, 20 a 21 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti vysokopevnostní ořezuvzdorné oceli s firemním označením Hardox 500, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

Tato ocel se používá převážně v aplikacích, kde se vyžaduje velmi vysoká životnost v podmínkách abraze, případně pro aplikace ve velmi tvrdých horninách nebo minerálech.

C	Si	Mn	P	S	B	Mo	Cr	Ni
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,27	0,7	1,6	0,025	0,01	0,004	0,25	1	0,25

Tab. 19. Chemické složení tl. 4-13 mm

Tvrđost	KV (-40°C)
HVB	[J]
470-530	40

Tab. 20. Mechanické vlastnosti tl. 20 mm

tloušťka	CE
[mm]	[%]
1 - 4	0,4
13-26	0,42
26-40	0,43
40-80	0,46

Tab. 21. Uhlíkový ekvivalent**Hardox 600**

V tabulkách 22, 23 a 24 jsou uvedeny základní metalurgické vlastnosti vysokopevnostní ořezuvzdorné oceli s firemním označením Hardox 600, chemické složení a vypočtený uhlíkový ekvivalent CE pro vyráběné tloušťky této oceli.

Tento plech se vyrábí o tvrdosti 100% HB. Ocel nabízí extrémní tvrdost při vysoké úrovni houževnatosti ve srovnání s ostatními materiály podobné tvrdosti (litina, keramika, apod.).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,48	0,7	1	0,015	0,01	2,5	0,8	1,2

Tab. 22. Chemické složení tl. 4-13 mm

Tvrdost	KV (-40°C)
HVB	[J]
560-640	20

Tab. 23. Mechanické vlastnosti

tloušťka	CE
[mm]	[%]
20.I	1,21

Tab. 24. Uhlíkový ekvivalent

2 SVAŘITELNOST JEMNOZRNÝCH MIKROLEGOVANÝCH OCELÍ

Při svařování jemnozrných mikrolegovaných ocelí se zaměřuje na sledování vlivu podmínek svařování na vlastnosti spoje v tepelně ovlivněné oblasti a na vlastnosti svarového kovu. U těchto ocelí se mění mikrostruktura oceli v závislosti na účinku tepla v tepelně ovlivněné oblasti, za současné změny tvrdosti a houževnatosti.

Svarové spoje se nesmí poškodit vlivem mechanismu tvorby trhlin za horka (dendritické a segregačně-likvační), za studena (indukované vodíkem), žíhacích (relaxačních), a lamelárních trhlin. Dále musí být bez vrubů a musí splňovat předepsané hodnoty tvrdosti dle normy ČSN EN 15614-1.

Tyto vyjmenované vady materiálu jsou velmi nebezpečné mohou vést k haváriím svařovaných konstrukcí a zařízení. Nejhorší jsou účinky vrubů, důsledky zkřehnutí difuzním vodíkem a nesprávným tepelným zpracováním po svařování těchto ocelí.

Jemnozrné mikrolegované oceli se v odůvodněných případech (při větších tloušťkách) svařují s předehřevem a s limitovaným měrným tepelným příkonem, protože při svařování těchto ocelí může nastat růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů a tím i poklesnou plastické vlastnosti v této oblasti. Pokud je předehřev nutný, volí se teploty kolem 100 až 150°C.

U těchto ocelí můžeme očekávat zvýšenou náchylnost ke vzniku teplých likvačních trhlin. Požadavkem na výrobu jemnozrných mikrolegovaných ocelí je proto snížení obsahu síry na max. 0,02 hm. %. Při použití metod svařování s vysokým stupněm promísení svarového kovu se základním materiálem, může svarový kov niobem legovaných, mikrolegovaných jemnozrných ocelí zkřehnout v důsledku precipitačního zpevnění karbonitridy niobu. Niob přechází do svarového kovu z roztaveného základního materiálu.

3 METODY SVAŘOVÁNÍ JEMNOZRNÝCH MIKROLEGOVANÝCH OCELÍ

Jemnozrné oceli svařujeme obloukovým svařováním tavící se elektrodou v aktivním plynu (135), obloukovým svařováním obalenou elektrodou (111). Těmito metodami se svařují oceli termomechanicky zpracované, tzn. normalizačně žíhané a zušlechťené oceli, a to ve všech polohách. Dále můžeme tyto oceli svařovat obloukovým svařováním pod tavidlem drátovou elektrodou (121) a obloukovým svařováním plněnou elektrodou (trubičkovým drátem) v aktivním plynu (136).

3.1 Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (135)

Tato metoda je založena na principu, že oblouk hoří mezi tavící se elektrodou a svařovaným materiálem. Elektroda (drát) se odvíjí z cívky a je podáván podávajícím zařízením přes bowden do místa svaru.

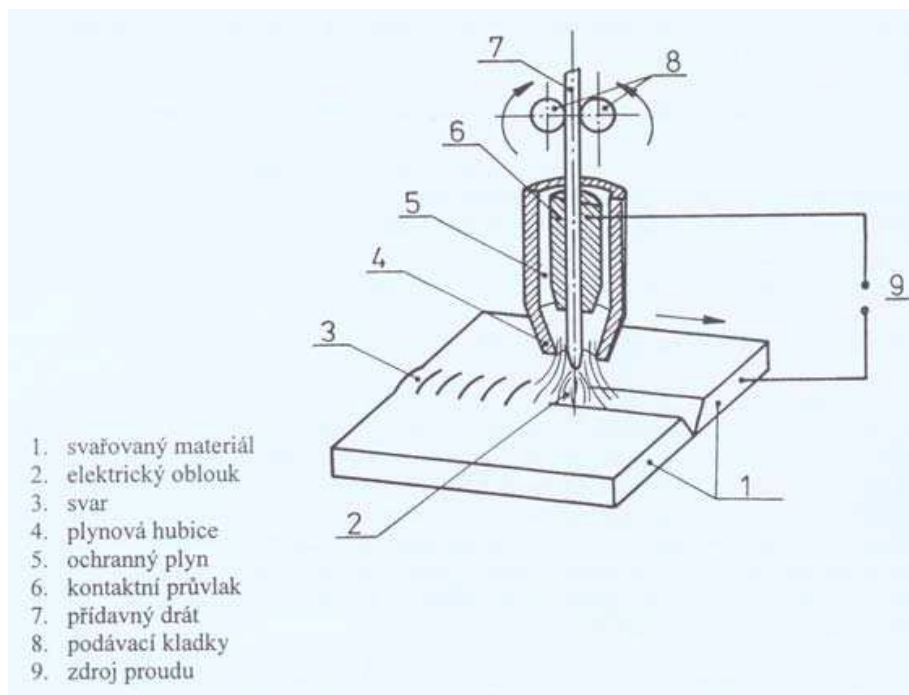
Zvolený druh ochranného plynu má zásadní vliv na hloubku závaru a stabilitu hoření oblouku. Ochranný plyn u této metody obsahuje kyslík, který reaguje se svarovým kovem. Plynem je například CO_2 nebo směsi $\text{Ar}+\text{CO}_2$.

Zdroje proudu používáme stejnosměrné zdroje proudu, které musí mít plochou statickou charakteristiku. To znamená, že při malé změně napětí dochází k velké změně svařovacího proudu.

Elektroda je připojena na plus pól, pokud by byla připojena na mínus pól, pak dochází k vyššímu rozstříku kovu. Toto připojení se proto hodí pro návary.

3.1.1 Použití metody pro dané materiály

Metodu 135 lze použít pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, které mají zaručené fyzikální a mechanické vlastnosti a mají nízký obsah škodlivých látek, a to především síry a fosforu. Fosfor způsobuje náchylnost ke křehkým lomům a síra způsobuje náchylnost k teplým trhlinám. Tyto prvky obecně snižují plastické vlastnosti svarového kovu.



Obr. 1. Princip svařování metodou 135

3.1.2 Zdroje svařování a příslušenství

Pro metodu svařování 135 se používají zdroje stejnosměrného proudu. Pro metodu svařování 136 by zdroje měly umožňovat svařování vyššími svařovacími proudy, je to nutné z důvodu vyššího proudového zatížení, používaného u trubičkových drátů, zvláště pro větší průměry.

Skládají se ze:

- zdroje elektrického proudu,
- podávacího zařízení,
- svařovacího hořáku a bowdenu,
- zemnicího kabelu ,
- láhve s ochranným plynem (na ní jsou redukční a regulační ventil).

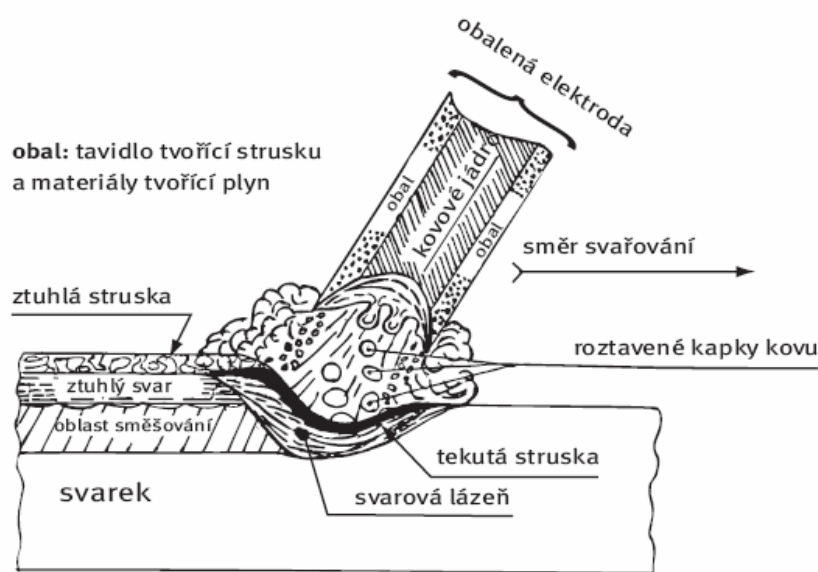
Zdroj svařování

Jako zdroj proudu se může použít středofrekvenční nebo vysokofrekvenční tranzistorový střídač nebo řízený tyristorový usměrňovač. Na zdroji můžeme volit statickou charakteristiku pomocí přepínače charakteristik, je možno volit mezi strmou, polostrmou nebo plochou statickou charakteristikou. Pro metodu svařování 135 používáme plochou nebo polostrmou statickou charakteristiku. Na zdroji jsou také umístěny ovládací, regulační a měřicí prvky.

3.2. Obloukové svařování obalenou elektrodou (111)

Při obloukovém svařování obalenou elektrodou je zdrojem tepla elektrický oblouk, který hoří mezi obalenou elektrodou a svařovaným materiálem. Dochází tedy k tavení elektrody a povrchu základního materiálu. Princip svařování spočívá v tom, že tavený struskový obal a roztavený kov elektrody přechází sloupцем oblouku do roztavené lázně svařovaného materiálu. Poté se materiály vzájemně smísí a vytváří se svar, který je chráněn struskou.

Svařovací oblouk tvoří elektrický výboj kruhového průřezu. Aby se udržel svařovací oblouk, musí být proud dostatečně velký a napětí vyšší než je ionizační napětí. V oblouku jsou na žhavené katodě uvolňovány elektrony, které procházejí sloupcem vodivé plazmy na anodu.



Obr. 2. Přesuny částic v elektrickém oblouku

4 VOLBA PŘÍDAVNÝCH MATERIÁLŮ PRO JEDNOTLIVÉ METODY SVAŘOVÁNÍ A VYBRANÉ ZÁKLADNÍ MATERIÁLY

4.1 Přídavné materiály

Volí se podle požadovaných vlastností svarového kovu a metody svařování. Pro jemnozrnné mikrolegované oceli, kde se svařují náročné svarové spoje s dosažením požadovaných mechanických vlastností svarového kovu, se používají přídavné materiály dolegované molybdenem, nebo molybdenem, manganem a niklem. Některé mikrolegované jemnozrnné oceli se používají i na výrobu svařovaných konstrukcí pracujících při pracovních teplotách až -60°C .

Doporučené průměry přídavných materiálů pro obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (135) jsou průměry 0,8; 1,0 a 1,2 mm. Mohou se také použít plněné elektrody stejných průměrů, a to 0,8 až 1,2 mm. Klasifikace plněných elektrod pro svařování jemnozrnných ocelí je uvedena v normě ČSN EN ISO 17632.

Obalené elektrody pro svařování vysokopevnostních ocelí jsou z hlediska klasifikace uvedeny v normě ČSN EN ISO 14341.

Elektrody se musí před použitím dobře vysušit z důvodů dosažení nejnižšího obsahu difuzního vodíku ve svarovém kovu z důvodu možné iniciace vzniku trhlin za studena a pórovitosti.

Chemické složení přídavných materiálů je různorodé a může se měnit ve složení substitučních prvků (Ni, Cr, Mn, Mo) podle výrobců přídavných materiálů.

Metoda svařování	111	135	136
Ocel	OK xx.xx	Ok Autrod Ok Aristorod	Ok Tubrod xx.xx
S 690 QL	48.00, 48.68, 53.68, 74.78, 75.75	12.50, 12.51, 13.13, 13.29	14.03, 15.00, 15.17
S 890 QL	48.00, 48.68, 53.68, 75.75, 75.78	12.50, 12.51, 13.29, 13.31	15.00, 15.17
S 960 QL	48.00, 48.68, 53.68, 75.75, 75.78	12.50, 12.51, 13.29, 13.31	15.00, 15.17
S 1100 QL	48.00, 48.68, 75.78	12.50, 12.51, 13.31	15.00, 15.17

Tab. 25. Doporučené přídavné materiály [6]

Značení		Typické chemické složení svarového kovu [%]:							
AWS (A5.5)	EN	C	Si	Mn	Mo	P	S	Cr	Ni
E7028	OK 38.65	0,08	0,4	1,1					
E7018	OK 48.00	0,06	0,5	1,1					
E7018	OK 48.08	0,06	0,35	1,2		< 0,02	< 0,015		
E7016-1	OK 53.68	0,07	0,5	1,1					
	OK 48.68	0,06	0,5	1,2					
E9018D1	OK 74.78	0,06	0,35	1,5	0,35				
E11018G	OK 75.75	0,05	0,3	1,8	0,4			0,45	2,2

Tab. 26. Přídavný materiál pro svařování metodou 111 [6]

Značení	Typické mech.hodnoty svar.kovu		
EN	Re [Mpa]	Rm [Mpa]	A ₅ [%]
OK 38.65	430	540	30
OK 48.00	445	540	29
OK 48.08	540	600	26
OK 53.68	470	560	30
OK 48.68	470	560	28
OK 74.78	600	660	24
OK 75.75	755	820	20

Tab. 27. Mechanické hodnoty svarového kovu po svaření metodou 111 [6]

Značení		Typické chemické složení svarového kovu [%]:						
AWS (A5.28)	EN	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
ER70S-6	12.51	0,09	0,9	1,5				
ER100S-G	13.13	0,1	0,7	1,4	0,6	0,6	0,2	
ER100S-G	13.29	0,08	0,6	1,6	0,3	1,4	0,25	0,07
ER110S-G	13.31	0,11	0,75	1,85	0,35	1,9	0,5	

Tab. 28. Přídavný materiál pro svařování metodou 135 [6]

Ochranná atmosféra: Ar + (5 – 25)% CO

Značení	Typické mech.hodnoty svar.kovu		
	Re[Mpa]	Rm[Mpa]	A ₅ [%]
12.51	475	560	24
13.13	690	770	20
13.29	750	820	19
13.31	850	890	17

Tab. 29. Mechanické hodnoty svarového kovu po svaření metodou 135 [6]

4.2 Předehřev při svařování

Předehřev svarových spojů je jedním ze základních technologických opatření, kterým snižujeme riziko vzniku studených trhlin ve svarových spojkách. Můžeme ho definovat jako teplotu, na kterou jsou ohřáty svařované části v místě budoucího svaru, bezprostředně před zhotovením první housenky nebo vrstvy svaru.

Snižuje rychlost ochlazování svaru a tím zabraňuje zakalení tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje a svarového kovu. Umožňuje také vznik struktur příznivějších z hlediska difuze vodíku, apod.

Teplotu předehřevu můžeme stanovit výpočtem z rovnic sestavených na základě statistického vyhodnocení zkoušek praskavosti, nebo z dlouhodobých praktických zkušeností.

Například svařujeme-li jemnozrnnou mikrolegovanou ocel s mezí kluzu $Re < 355$ MPa, není obvykle požadován předehřev do tloušťky svarového spoje cca 30mm. Pokud ale použijeme k jejímu svaření přídavný materiál s 2,5 hm. % Ni, musíme předehřívát na teploty 100 až 150°C již od tloušťky svarového spoje 16 mm, protože Ni zvyšuje prokalitelnost oceli.

Doporučené teploty pro předehřev pro různě kombinované (sumární) tloušťky plechu [mm]												Doporučené interpass teploty
t1+t2+t3=	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	[°C]
S355 (SS2132)								75°C				225 - 250
WELDOX 355												225 - 250
WELDOX 420/460									75°C			225 - 250
WELDOX 500									75°C			200 - 225
WELDOX 700			75°C					100°C		150°C		200 - 225
WELDOX 900*	75	100°C								150°C		150 - 175
WELDOX 960*	75	100°C								150°C		150 - 175
WELDOX 1100*	100	125°C			150°C				175°C			150 - 175
HARDOX 400			75°C			100°C			175°C			150 - 175
HARDOX 500	100	125	150°C		175°C							150 - 175
*) Teplota předehřevu je dána přídatným materiálem, pokud uhlíkový ekvivalent tohoto materiálu je vyšší než uhlíkový ekvivalent plechu												

Tab. 30. Doporučené teploty předehřevu [7]

Doporučené teploty předehřevu vycházejí z předpokladu, že:

- obsah vodíku je menší než 5 ml/100 g svarového kovu
- tepelný příkon je zhruba 1,7 kJ/mm

Výpočet teploty předehřevu dle ČSN EN 1011-2:

Tato metoda se používá pro eliminaci vodíkového praskání ocelí skupin 1 až 4 dle ČSN 05 0323, které splňují podmínky pro výpočet ekvivalentního uhlíku CET. Teplota předehřevu se stanovuje výpočtem, který zahrnuje:

C	Si	Mn	P	S	B	Mo	Cr	Ni
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,19	0,49	1,3	0,008	0,002	0,001	0,024	0,7	0,05

Tab. 31. Chemické složení svařovaného materiálu Hardox 450, tl.12 mm

Vliv chemického složení oceli:

$$\begin{aligned}
 T_{P_{CET}} &= 750 \cdot CET - 150 \\
 T_{P_{CET}} &= 750 \cdot 0,554 - 150 \\
 T_{P_{CET}} &= 265,5^{\circ}C
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Výpočet uhlíkového ekvivalentu CET:

$$\begin{aligned}
 CE &= C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \\
 CE &= 0,19 + \frac{1,3}{6} + \frac{0,7 + 0,024 + 0}{5} + \frac{0,05 + 0}{15} \\
 CE &= 0,554\%
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Vliv tloušťky svařovaných materiálů d [mm]:

$$\begin{aligned}
 T_{Pd} &= 160 \cdot \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \\
 T_{Pd} &= 160 \cdot \tanh\left(\frac{12}{35}\right) - 110 \\
 T_{Pd} &= -57,2^{\circ}C
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Vliv obsahu difuzního vodíku HD ve svarovém kovu v [ml.100g⁻¹]:

$$\begin{aligned}
 T_{P_{HD}} &= 62 \cdot HD^{0,35} - 100 \\
 T_{P_{HD}} &= 62 \cdot 5^{0,35} - 100 \\
 T_{P_{HD}} &= 8,90^{\circ}C
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Vliv tepelného příkonu Q [$\text{kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$]:

$$\begin{aligned}T_{pQ} &= (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \\T_{pQ} &= (53 \cdot 0,554 - 32) \cdot 0,74 - 53 \cdot 0,554 + 32 \\T_{pQ} &= -63,31^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (5)$$

Vliv vnitřního napětí:

V současné době je kvantitativní vztah mezi úrovní vnitřního napětí a teplotou předehřevu znám pouze do určité míry. Velikost vnitřního napětí a trojosý stav napjatosti zvyšují minimální teplotu předehřevu. Pro výpočet předehřevu se předpokládá, že vnitřní napětí přítomné v oblasti svaru se rovnají mezi kluzu základního materiálu, respektive svarového kovu. [4]

Teplotu předehřevu T_p je možné vypočítat jako součet příspěvků jednotlivých parametrů k teplotě předehřevu:

$$\begin{aligned}T_p &= T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \\T_p &= 265,5 + (-57,2) + 8,90 + (-63,31) \\T_p &= 153,89^\circ\text{C}\end{aligned}\quad (6)$$

Teplota předehřevu vyšla nad meze pro daný materiál a svařovanou tloušťku. Pro svaření materiálu Hardox 450 tl. 12 mm metodou svařování 135 a 111 byl předehřev zvolen 100°C .

4.3 Tepelné zpracování po svařování

Žíhání ke snížení vnitřního pnutí se provádí za účelem snížení zbytkového pnutí po svařování.

Tuhé svarové spoje z jemnozrnných mikrolegovaných ocelí se po svaření jen žíhají na snížení vnitřních napětí. Teploty žíhání na snížení vnitřního napětí se volí tak, aby nedošlo ke tvorbě nevyhovující disperse karbo-nitridické fáze, tj. precipitaci velkého počtu malých částic s velmi malou střední vzájemnou vzdáleností. Používá se nižší rozmezí žíhacích teplot, obvykle 560 až 600°C. V tomto teplotním rozmezí se obvykle dosáhne optimálního poměru pevnostních a plastických vlastností žíhaného svarového spoje. Výdrž na teplotě žíhání se velmi často stanovuje podle dlouholetou praxí ověřeného kritéria 4 minuty na 1 mm maximální tloušťky žíhané konstrukce. [4]

Ocel WELDOX lze za účelem snížení pnutí žíhat pouze v případě, že tento postup vyžadují konstrukční předpisy. Ocel HARDOX a WELDOX 1100 se za účelem snížení pnutí nesmí žíhat. [7]

Hlavní rozdíl při výrobě těchto dvou skupin ocelí je v závěrečné fázi tepelného zpracování - popouštění. Zatímco se otěruvzdorné oceli HARDOX po kalení nepopouštějí, nebo se popouštějí jen na nízké teploty (cca 200°C), vysokopevné konstrukční oceli WELDOX se popouštějí na vysoké teploty (cca 600°C). Vyšší popouštěcí teplotou vznikne ve vysokopevných konstrukčních ocelích jiná rovnováha mezi pevností a houževnatostí - úroveň houževnatosti je povýšena na úkor pevnosti (tvrdosti). [7]

Opatření pro zvýšení meze únavy

Mez únavy svaru lze zvýšit různým dodatečným zpracováním. Tímto se docílí plynulejší přechod mezi svarem a plechem a sníží se koncentrace pnutí.

Pro svařování oceli HARDOX a WELDOX se doporučuje dodržovat určitá omezení tepelného příkonu (Obr. 3). Hodnoty tepelného příkonu pod níže uvedenými hodnotami zajišťují uspokojivou kombinaci houževnatosti, pevnosti a tvrdosti tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 3. Doporučený tepelný příkon svařování [7]

Hodnota tepelného příkonu se vypočítá dle normy ČSN EN 1011-1.

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (7)$$

Kde: Q....množství tepla přivedené do svarového spoje na jednotku jeho délky [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]

U....napětí při svařování [V]

I.....intenzita svařovacího proudu [A]

v.....rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

k.....koeficient tepelné účinnosti metody svařování [-]

pro metodu svařování 111..... $k = 0,8$ [-]

pro metodu svařování 135..... $k = 0,8$ [-]

5 NÁVRH METODIKY EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

Cílem experimentální části této práce je ověřit základní mechanické vlastnosti svarových spojů po svařování. Svařovaný plech Hardox 450 o tloušťce 12 mm byl svařen metodami svařování:

- 135 - obloukovým svařováním tavící se elektrodou v aktivním plynu s přídavným materiálem – drát G3Si1 (Tysweld), s ochranným plynem ArcalMag,
- 111 – obloukovým svařováním obalenou elektrodou s přídavným materiálem – elektroda OK 48.00 (ESAB),

Hodnotila jsem mechanické vlastnosti tupého V spoje a koutového spoje. Pro tuto úpravu svarových ploch byl plech svařen v polohách PF (svislá nahoru) a PC (vodorovná).

V této části práce se budu zabývat ověřením základních mechanických vlastností tupého V svaru, koutový spoj, který byl také svařen není předmětem této práce.



Obr. 4. Tupý V spoj (metoda 111, poloha PF)



Obr. 5. Tupý V spoj (metoda 135, poloha PC)

5.1 Svařování zkušebních vzorků metodou 135

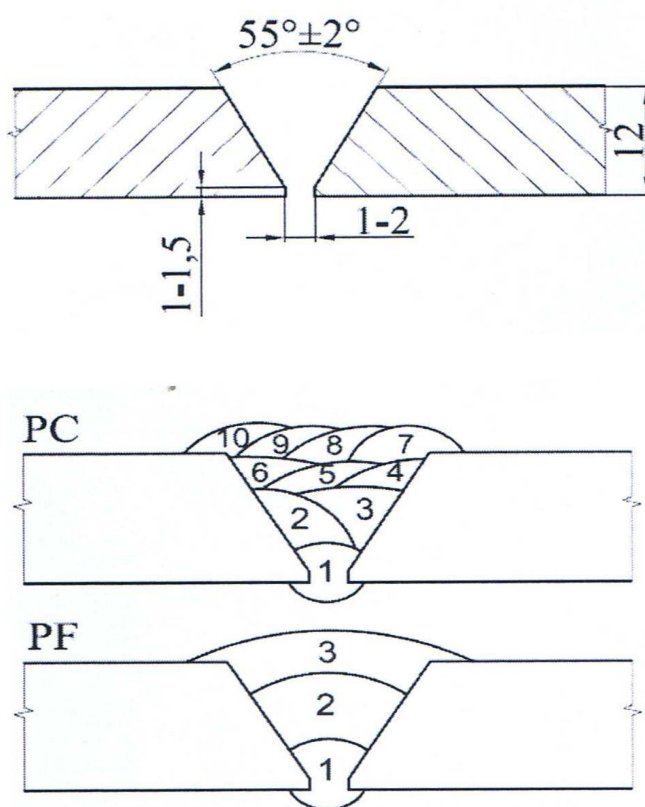
Před svařením plechu Hardox 450 tloušťky 12 mm byly upraveny svarové plochy na tupý V spoj, a to frézováním a broušením. Teplota předehřevu byla zvolena 100°C a teplota Interpass max. 150°C. Ke svaření se použil přídatný materiál – drát G3Si1 od výrobce Tysweld a ochranný plyn ArcalMag od výrobce Air Products.

C	Si	Mn	P	S	B	Mo	Cr	Ni
max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %	max. %
0,19	0,49	1,3	0,008	0,002	0,001	0,024	0,7	0,05

Tab. 32. Chemické složení základního materiálu

Chemické složení		Mechanické vlastnosti	
C	0,06 ~ 0,15	R_m [MPa]	≥ 500
Mn	1,40 ~ 1,85	R_{p0,2} [MPa]	≥ 420
Si	0,80 ~ 1,15	A₅ [%]	≥ 22
S	≤ 0,035	KV [J]	≥ 27
P	≤ 0,025		
Cu	≤ 0,5		

Tab. 33. Chemické a mechanické vlastnosti přídavného materiálu



Obr. 6. Schéma spoje / postup svařování

Housenka	Průměr	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/s]	Tepelný příkon [KJ/mm]
Poloha svařování PF:					
1	1,0	85,0 ÷ 95,0	17,0 ÷ 18,0	1,7	0,74
2	1,0	122,0 ÷ 130,0	18,0 ÷ 19,5	1,2	1,58
3	1,0	118,0 ÷ 128,0	17,5 ÷ 18,5	1,0	1,77
Poloha svařování PC:					
1	1,0	97,0 ÷ 105,0	18,0 ÷ 19,0	2,9	0,52
2	1,0	148,0 ÷ 155,0	19,0 ÷ 20,0	5,3	0,45
3	1,0	148,0 ÷ 155,0	19,0 ÷ 20,0	5,2	0,45
4	1,0	146,0 ÷ 152,0	19,0 ÷ 20,0	7,2	0,32
5	1,0	146,0 ÷ 152,0	19,0 ÷ 20,0	6,8	0,34
6	1,0	147,0 ÷ 155,0	19,0 ÷ 20,0	5,4	0,44
7	1,0	145,0 ÷ 150,0	19,0 ÷ 20,0	7,5	0,31
8	1,0	145,0 ÷ 150,0	19,0 ÷ 20,0	6,1	0,38
9	1,0	144,0 ÷ 149,0	19,0 ÷ 20,0	6,3	0,36
10	1,0	152,0 ÷ 158,0	19,5 ÷ 20,5	6,3	0,39

Tab. 34. Parametry svařování tupého svarového spoje

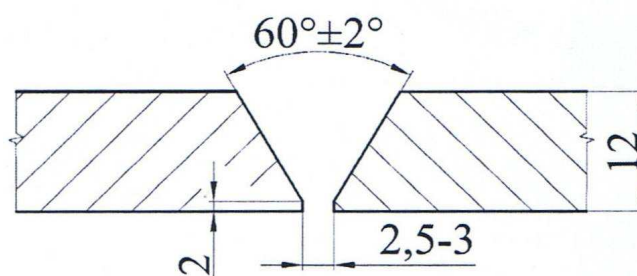
Při svařování byla použita ochranná atmosféra ArcalMag (18% CO₂ v Ar), polarita svařování DC/+ (stejnoseměrný proud), svařovací zdroj Vario Synergic 4000, multimetr OMEGA HHM599 a teploměr OMEGA HH22. S ohledem na použité parametry svařování (viz. tab. 34), byl přenos svarového kovu zkratový.

5.2 Svařování zkušebních vzorků metodou 111

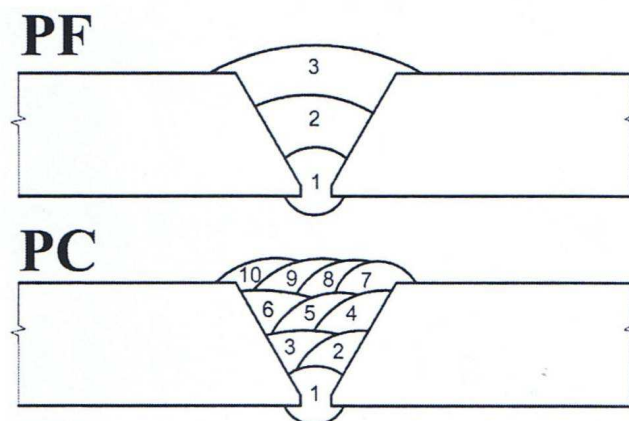
Také před svařením plechu Hardox 450 tloušťky 12 mm byly upraveny svarové plochy na tupý V spoj, a to řezáním a broušením. Teplota předehřevu byla zvolena s ohledem na svařovanou tloušťku (viz. tab. 30) 100°C a teplota Interpass max. 150°C. Ke svaření se použil přídatný materiál – elektroda OK 48.00 od výrobce ESAB. Elektrody před svařováním nebyly sušeny, bylo použito elektrod ve vakuovém balení Vac Pac.

Chemické složení		Mechanické vlastnosti	
C	0,06	R_m [MPa]	540
Mn	1,4	R_e [MPa]	445
Si	0,5	A₅ [%]	29
S	0,015	KV (-20°C) [J]	140
P	0,02		

Tab. 35. Typické chemické složení a mechanické vlastnosti čistého svarového kovu elektrody OK 48.00



Obr. 7. Schéma spoje



Obr. 8. Postup svařování

Housenka	Průměr	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost svařování [mm/s]	Tepelný příkon [KJ/mm]
Poloha svařování PF:					
1	2,5	74,0 ÷ 76,0	18,0 ÷ 22,0	0,7	1,72
2	3,2	105,0 ÷ 110,0	21,0 ÷ 24	1,1	1,76
3	3,2	105,0 ÷ 110,0	22,0 ÷ 25,0	0,8	2,53
Poloha svařování PC:					
1	2,5	72,0 ÷ 77,0	20,0 ÷ 23,0	1,0	1,28
2	3,2	129,0 ÷ 138,0	19,0 ÷ 24,0	4,0	0,58
3	3,2	135,0 ÷ 142,0	19,0 ÷ 24,0	4,3	0,56
4	3,2	135,0 ÷ 142,0	19,0 ÷ 24,0	5,0	0,48
5	3,2	128,0 ÷ 136,0	22,0 ÷ 25,0	5,3	0,47
6	3,2	128,0 ÷ 140,0	21,0 ÷ 25,0	4,7	0,53
7	3,2	132,0 ÷ 143,0	21,0 ÷ 25,0	4,4	0,58
8	3,2	130,0 ÷ 144,0	21,0 ÷ 25,0	3,5	0,72
9	3,2	130,0 ÷ 144,0	21,0 ÷ 25,0	3,7	0,68
10	3,2	128,0 ÷ 138,0	21,0 ÷ 24,0	3,8	0,63

Tab. 36. Parametry svařování

Při svařování byl použit svařovací zdroj KS 350, multimetr OMEGA HHM599 a teploměr OMEGA HH22, polarita svařování DC/+.

5.3 Vyhodnocení zkoušek

Svarové spoje byly podrobeny nedestruktivním zkouškám (vizuální kontrola, kapilární zkouška a zkouška prozářením) a zkoušky destruktivní (příčná zkouška tahem, zkouška lámavosti, zkouška rázem v ohybu, zkouška tvrdosti, zkouška makrostruktury a zkouška mikrostruktury). Všechna vyhodnocení zkoušek na jednotlivých vzorcích uvádím v následujících tabulkách.

Vyhodnocení nedestruktivních zkoušek

Nedestruktivní metody zkoušení používáme pro kontrolu jakosti svarových spojů bez jejich porušení a rozdělujeme je podle schopnosti identifikace vad na povrchu nebo uvnitř svaru. Byla provedena zkouška vizuální, zkouška kapilární (na povrch vzorku byl nanesen penetrační prostředek a vývojka a po určité době se na bílé vyvolávací vrstvě objeví barevná stopa vady, která se vyhodnotí) a zkouška prozářením (její princip spočívá v interakci použitého záření s hmotou kontrolovaného výrobku a v následném zviditelnění prošlého záření za kontrolovaným výrobkem vhodným detektorem [4]).

Metoda svařování 135:

Zkoušky	Prováděcí předpis	Požadavek dle předpisu	Výsledek
Vizuální kontrola	ČSN EN 970	ČSN EN ISO 5817 Stupeň jakosti B	Vyhovující
Zkouška kapilární	ČSN EN 571-1	ČSN EN 1289 Stupeň přípustnosti 2x	Vyhovující
Zkouška prozářením	ČSN EN 1435	ČSN EN 12517 Stupeň přípustnosti 1	Vyhovující

Tab. 37. Výsledky nedestruktivních zkoušekMetoda svařování 111:

Zkoušky	Prováděcí předpis	Požadavek dle předpisu	Výsledek
Vizuální kontrola	ČSN EN 970	ČSN EN ISO 5817 Stupeň jakosti B	Vyhovující
Zkouška kapilární	ČSN EN 571-1	ČSN EN 1289 Stupeň přípustnosti 2x	Vyhovující
Zkouška prozářením	ČSN EN 1435	ČSN EN 12517 Stupeň přípustnosti 1	Vyhovující

Tab. 38. Výsledky nedestruktivních zkoušek

Vyhodnocení destruktivních zkoušek

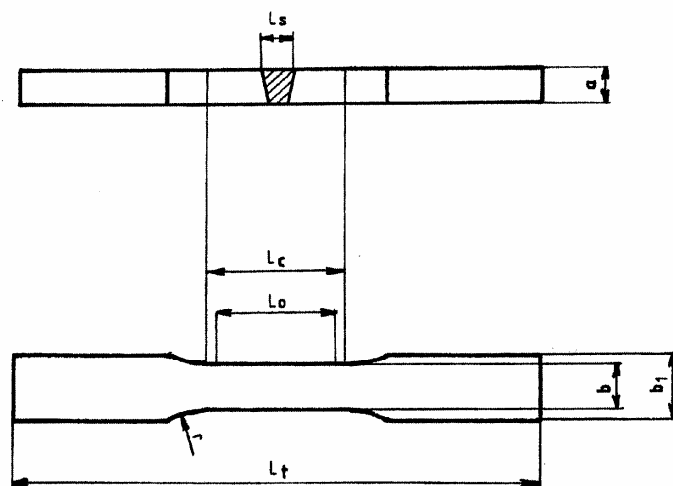
Destruktivní zkoušky se provádějí na zkušebních vzorcích před samotným zahájením výroby. Ověřují se základní mechanické vlastnosti svarových spojů.

Příčná zkouška tahem

Provedení této zkoušky předepisuje norma ČSN EN 895. V normě jsou stanoveny způsoby odběru zkušebních tyčí ze svarového spoje, jejich rozměry a opracování. Zkušební vzorky se odebírají příčně ze svarového spoje. Ve zkušebním stroji dochází za definovaných podmínek teploty, deformace a rychlosti k natahování zkušební tyče mezi dvěma příčníky od nulového zatížení k okamžiku přerušení tyče. Po přetržení se lomová plocha vyhodnotí.

Vzorek	Teplota [°C]	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A [%]	Z [%]	Místo porušení
Požadavek	+20	min. 500	-	-	-	R_m základ.mat.
135/1	+20	760	-	-	-	ve svaru
135/2	+20	760	-	-	-	ve svaru
Požadavek	+20	min. 500	-	-	-	R_m základ. mat.
111/1	+20	717	-	-	-	ve svaru
111/2	+20	714	-	-	-	ve svaru
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ						

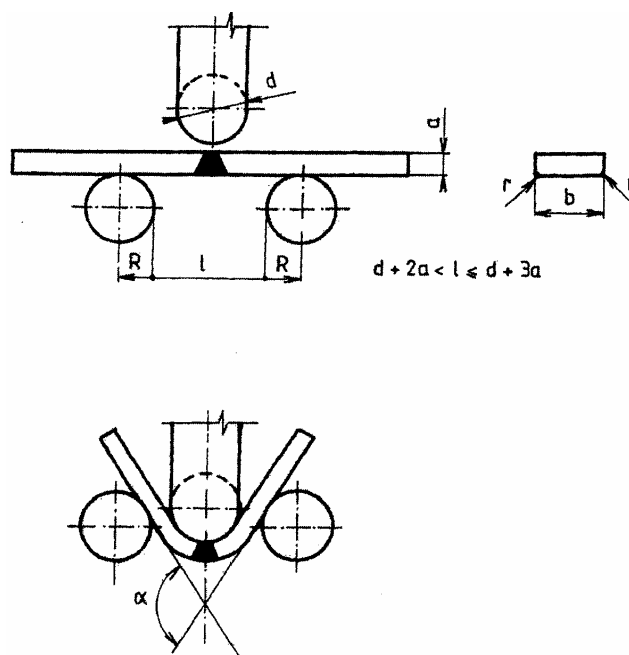
Tab. 39. Výsledky příčné zkoušky tahem svarového spoje



Obr. 9. Zkušební tyč pro plechy [4]

Zkouška lámavosti

Zkouška lámavosti svarového spoje prokazuje jeho tažnost a plastické vlastnosti. Používá se zejména pro zkoušení deformační schopnosti tupých svarových spojů. Principem zkoušky je ohnutí ploché tyče o tloušťce zkoušeného svaru (max. do 30 mm) okolo trnu do předepsaného úhlu ohybu. Průměr trnu je předepsán dle tloušťky a pevnosti zkoušeného materiálu. Za vyhovující je považováno dosažení úhlu ramen 180° při neporušení celistvosti materiálu, nebo vznik trhlin. Provedení zkoušky předepisuje norma ČSN EN 910.



Obr. 10. Schéma zkoušky lámavosti [4]

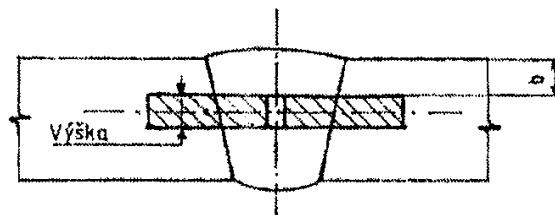
Vzorek	Teplota [°C]	Ø trnu [mm]	Úhel ohybu [°]	Tažená strana	výsledek	Pozn.
Požadavek	+20	4t	180	-	-	-
135/1	+20	4t	180	boční zk.	vyhovující	
135/2	+20	4t	180			
135/3	+20	4t	180			
135/4	+20	4t	180			trhlina 2,9 mm
Požadavek	+20	4t	180	-	-	-
111/1	+20	4t	180	boční zk.	vyhovující	trhlina 1,0 mm
111/2	+20	4t	180			trhlina 1,5 mm
111/3	+20	4t	180			
111/4	+20	4t	180			
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ						

Tab. 40. Výsledky zkoušky lámavosti

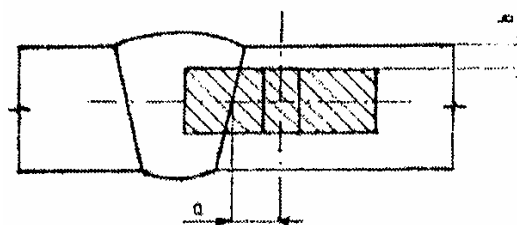
Zkouška rázem v ohybu

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 10045-1, norma ČSN EN 875 doplňuje tuto normu o umístění zkušebních tyčí ve svarovém spoji, způsob jejich značení apod. Označení zkušební tyče popisuje typ, umístění a orientaci vrubu ve svarovém spoji, dále následuje číselný údaj – vzdálenost vrubu od referenční linie ve svarovém spoji (mm):

- **VWT 0/2** – Charpy V vrub, vrub ve svarovém kovu, referenční linie je v ose svaru), 0- vrub v ose svaru, 2- vzdálenost mezi horním povrchem svarového spoje a blížším povrchem zkušební tyče,
- **VHT 2/2** – Charpy V vrub, vrub v TOO, referenční linií je linie natavení, 2- vzdálenost středu vrubu od referenční linie, 2- vzdálenost mezi horním povrchem svarového spoje a bližším povrchem zkušební tyče.



Obr. 11. Příklad umístění zkušební tyče ve svarovém spoji VWT 0/b



Obr. 12. Příklad umístění zkušební tyče ve svarovém spoji VHT a/b

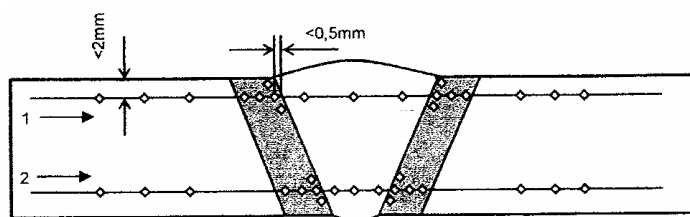
Vzorek	Teplota [°C]	Umíst. vrubu	Jednotlivé hodnoty			Průměr [J]	Poznámky
Požad.	-40	-	-	-	-	min. 27	přídavný mat.
135/V4-V6	-40	VWT 0/2	34	42	36	37	-
135/V7-V9	-40	VHT 2/2	70	53	58	60	-
Požad.	-40	-	-	-	-	min. 27	-
111/1	-40	VWT 0/2	49	36	36	40	-
111/2	-40	VHT 2/2	33	30	31	31	-
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ							

Tab. 41. Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Zkouška tvrdosti

Zkoušky tvrdosti svarových spojů se provádějí podle normy ČSN EN 1043-1. Tvrdost všech oblastí svarového spoje byla měřena tvrdostí podle Vickerse při zatížení 98N – HV 10. Zkouška byla provedena při teplotě 20°C. Doporučená vzdálenost vtisků je dána standardními normami. Do materiálu se vtlačuje čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°, tvrdost je hodnocena podle střední úhlopříčky vtisku. Zkouška tvrdosti dle Vickerse byla provedena na 4 vzorcích vždy ve dvou liniích:

- **vzorek č.1** – svařen metodou 135/poloha PC
- **vzorek č.2** – svařen metodou 111/poloha PC
- **vzorek č.3** – svařen metodou 135/poloha PF
- **vzorek č.4** – svařen metodou 111/poloha PF



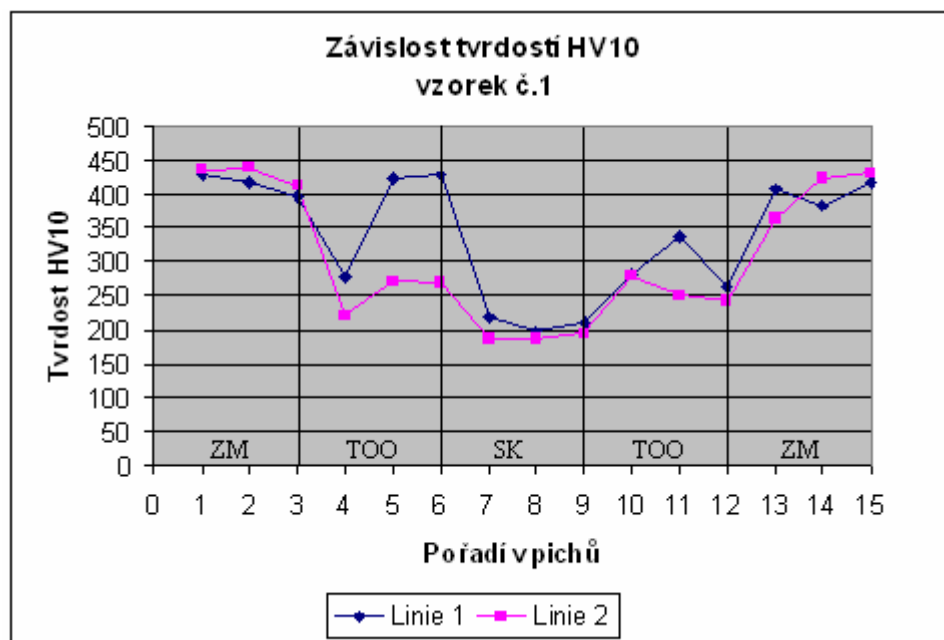
Obr. 13. Schéma průběhu tvrdosti HV 10 svarovým spojem

Linie 1:

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					396				335					
427	418	397	277	422	429	217	197	211	282	338	264	407	384	417
					361				290					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

Tab. 42. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.1**Linie 2:**

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					296				322					
437	440	411	221	271	269	185	187	195	278	251	241	365	424	431
					250				253					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

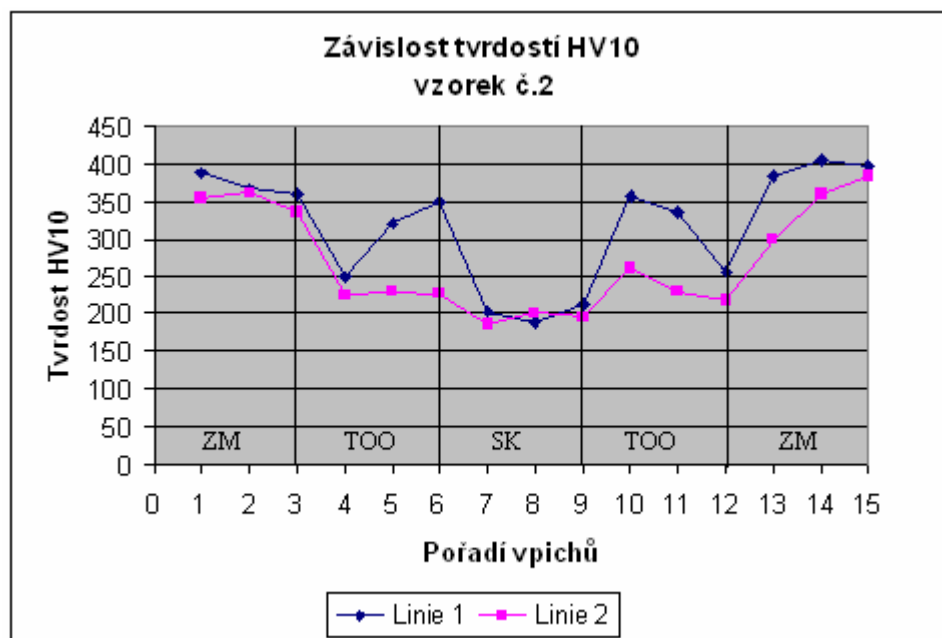
Tab. 43. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.1**Graf 1.** Závislost tvrdostí HV10, vzorek č.1

Linie 1:

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					366				314					
388	366	360	249	320	350	204	190	213	356	334	257	383	405	397
					327				333					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

Tab. 44. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.2**Linie 2:**

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					254				261					
354	362	334	224	230	228	186	200	196	261	230	217	299	359	384
					234				247					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

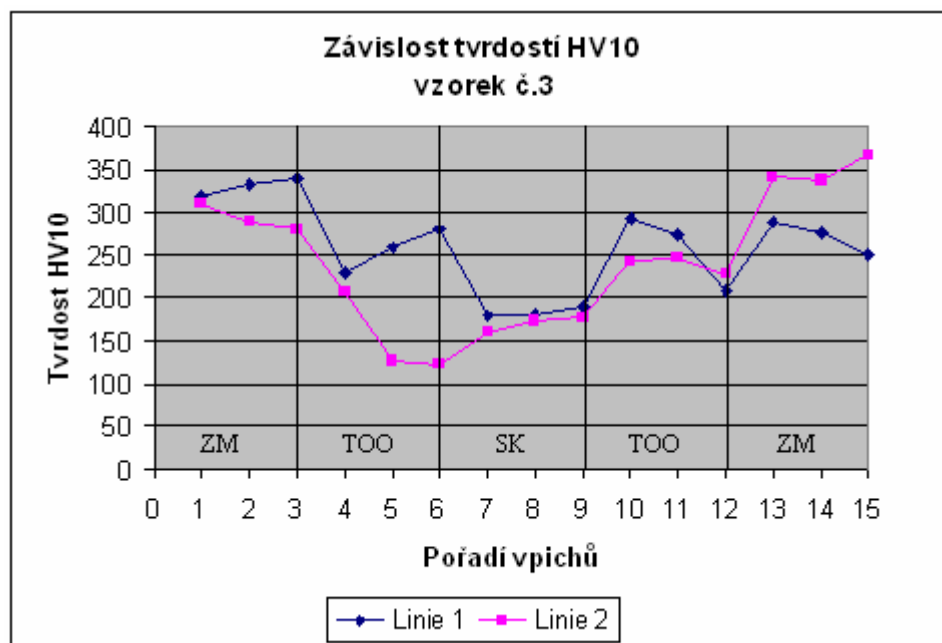
Tab. 45. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.2**Graf 2.** Závislost tvrdostí HV10, vzorek č.2

Linie 1:

TVRDOST HV 10															
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.			
						247				182					
317	333	339	230	260	279	179	182	189	292	274	209	289	276	251	
						121				242					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ															

Tab. 46. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.3**Linie 2:**

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					207				235					
309	289	279	206	127	123	160	172	176	243	247	228	342	336	366
					224				232					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

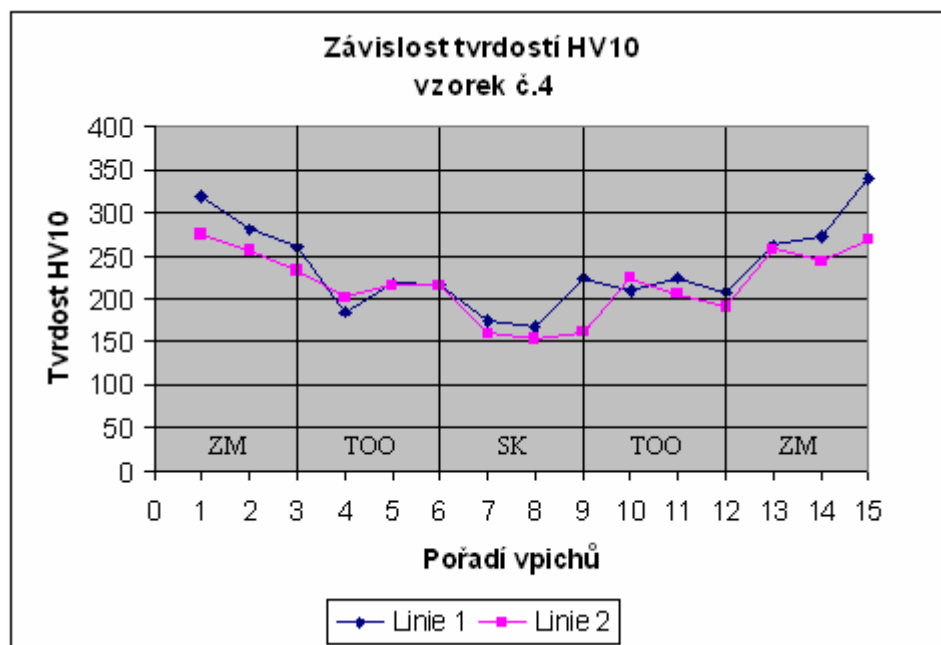
Tab. 47. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.3**Graf 3.** Závislost tvrdostí HV10, vzorek č.3

Linie 1:

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					216				251					
319	281	260	185	218	216	173	167	224	210	225	207	262	272	339
					227				235					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

Tab. 48. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.4**Linie 2:**

TVRDOST HV 10														
Základní mater.			TOO			Svarový kov			TOO			Základní mater.		
					219				221					
274	256	232	201	215	216	159	152	162	225	206	191	258	243	268
					218				221					
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ														

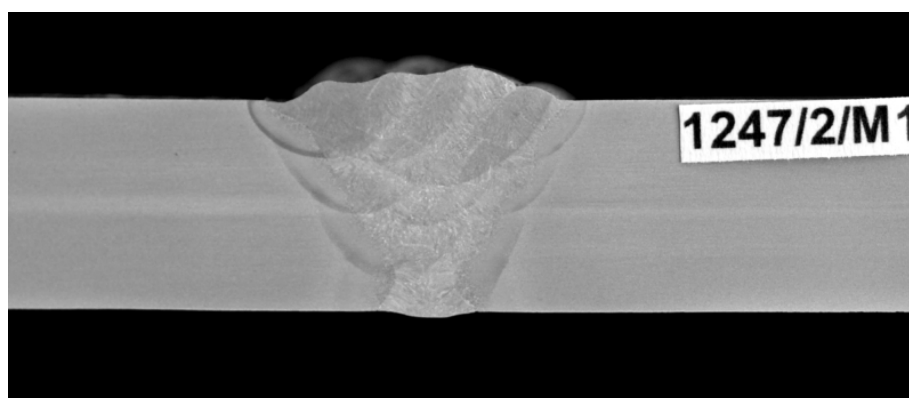
Tab. 49. Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku č.4**Graf 4.** Závislost tvrdostí HV10, vzorek č.4

Zkouška makrostruktury

Zkouška se provádí podle normy ČSN EN 1321. Vzorky byly připraveny v metalografické laboratoři, a to broušením za mokra na metalografických papírech s postupně snižující drsností papíru. Na vyvolání makrostruktury byl použit 10% vodní roztok HNO_3 . Vzorky s takto vyvolanou makrostrukturou byly vyfoceny.

Vzorek č.1	
Požadavek	Vady na zkušebním kusu se musí pohybovat v rozsahu stupně jakosti B dle ČSN EN ISO 5817, kromě vad č. 502, 503, 504, 5214, které mohou být v rozsahu stupně jakosti C.
Poznámky	Vady na zkušebním kusu nebyly identifikovány
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ	

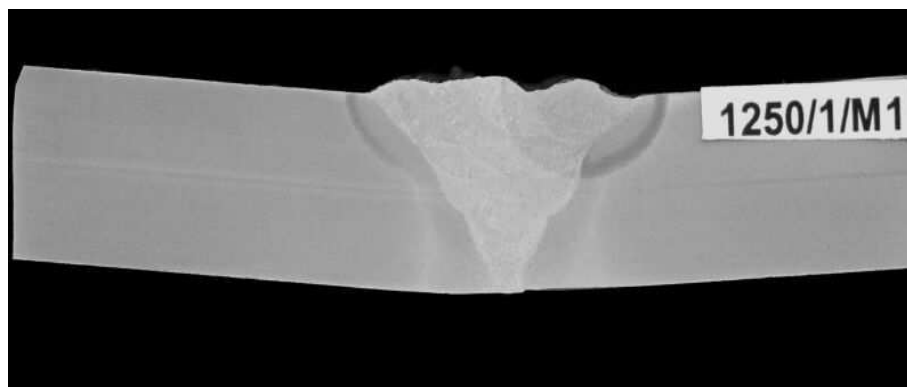
Tab. 50. Výsledky zkoušky makrostruktury svarového spoje



Obr. 14. Snímek makrostruktury svarového spoje

Vzorek č.2	
Požadavek	Vady na zkušebním kusu se musí pohybovat v rozsahu stupně jakosti B dle ČSN EN ISO 5817, kromě vad č. 502, 503, 504, 5214, které mohou být v rozsahu stupně jakosti C.
Poznámky	Vady na zkušebním kusu nebyly identifikovány
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ	

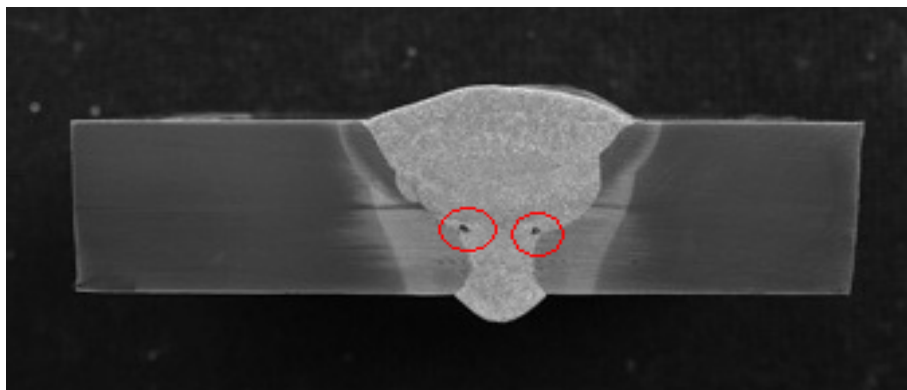
Tab. 51. Výsledky zkoušky makrostruktury svarového spoje



Obr.15. Snímek makrostruktury svarového spoje

Vzorek č.3	
Požadavek	Vady na zkušebním kusu se musí pohybovat v rozsahu stupně jakosti B dle ČSN EN ISO 5817, kromě vad č. 502, 503, 504, 5214, které mohou být v rozsahu stupně jakosti C.
Poznámky	Vady na zkušebním kusu nebyly identifikovány
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ	

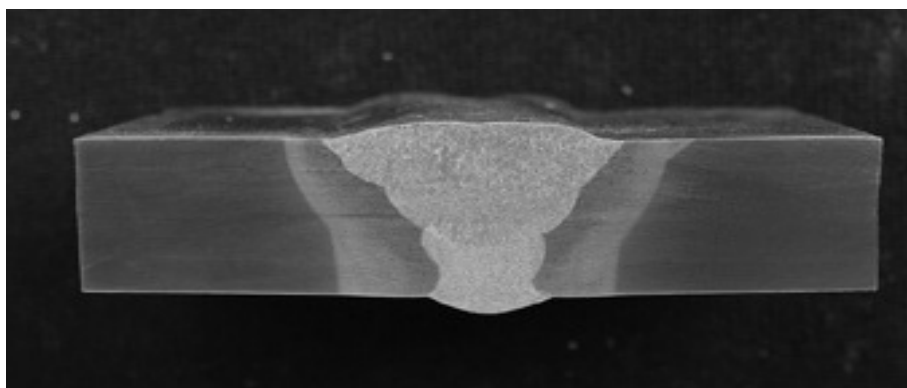
Tab. 52. Výsledky zkoušky makrostruktury svarového spoje



Obr.16. Snímek makrostruktury svarového spoje

Vzorek č.4	
Požadavek	Vady na zkušebním kusu se musí pohybovat v rozsahu stupně jakosti B dle ČSN EN ISO 5817, kromě vad č. 502, 503, 504, 5214, které mohou být v rozsahu stupně jakosti C.
Poznámky	Vady na zkušebním kusu nebyly identifikovány
Výsledek: VYHOVUJÍCÍ	

Tab. 53. Výsledky zkoušky makrostruktury svarového spoje



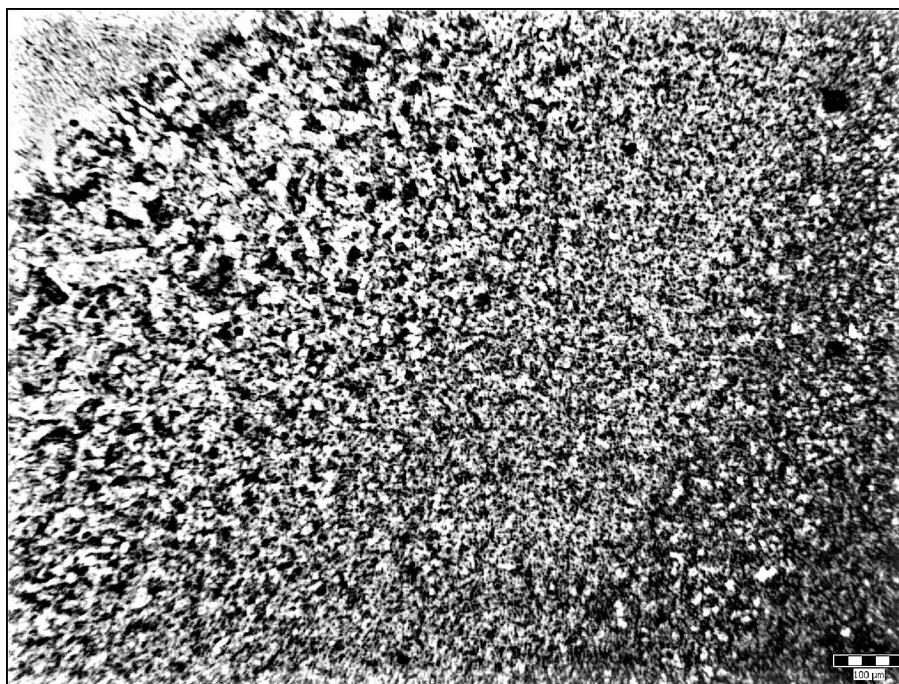
Obr.17. Snímek makrostruktury svarového spoje

Zkouška mikrostruktury

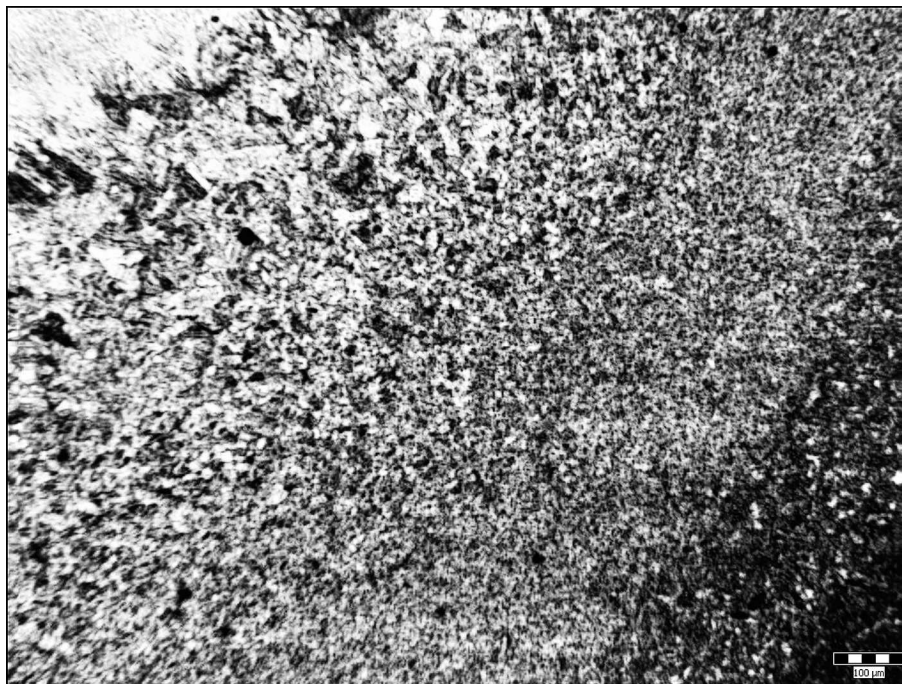
Při této zkoušce je zkoumána mikrostruktura jednotlivých oblastí svarového spoje. Vzorky byly opět připraveny v metalografické laboratoři, a to broušením za mokra na metalografických papírech s postupně snižující drsností papíru. Mikrostruktura byla vyvolána leptáním pomocí přípravku „Vilella“. Metalografické hodnocení struktur a jejich fotodokumentace byly provedeny na světelném mikroskopu Neophot 21 firmy Carl Zeiss.

U každého vzorku jsem sledovala a dokumentovala mikrostruktury:

- základního materiálu (ZM)
- tepelně ovlivněné oblasti (TOO)
- svarového kovu (SK)



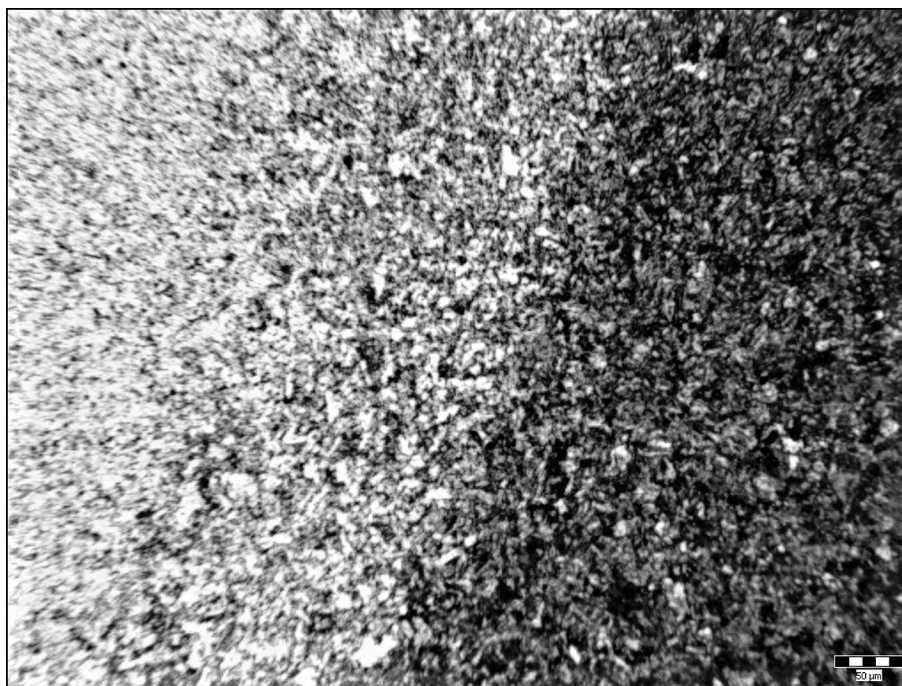
Obr. 18. Mikrostruktura svarového kovu (ferit + karbidy) a tepelně ovlivněné oblasti (TOO), mikrostruktura bainitická, vzorek č.1 (135/PC), (zvětšeno 50x)



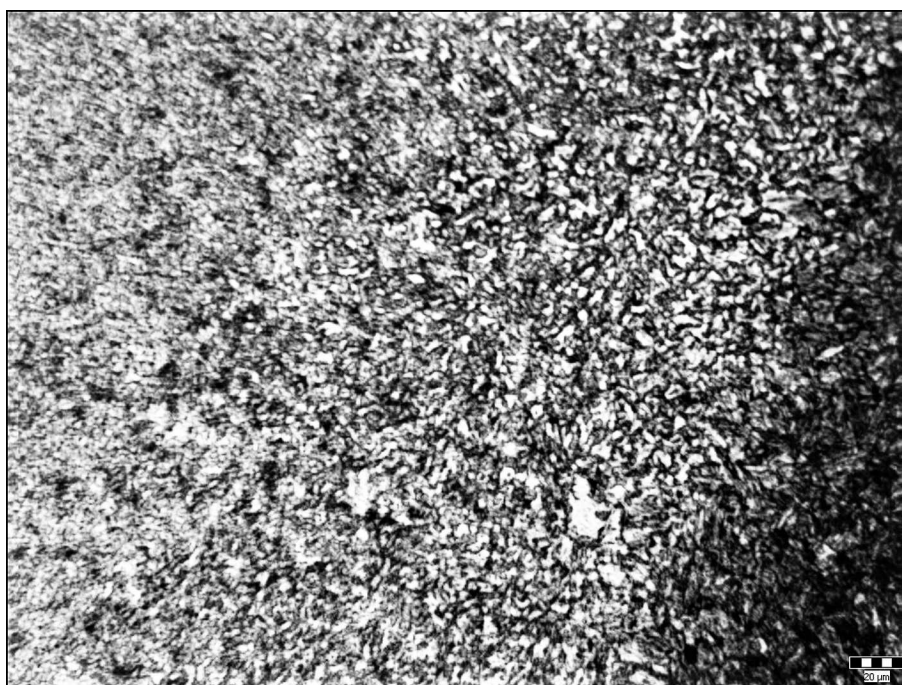
Obr. 19. Mikrostruktura svarového kovu (ferit + karbidy) a tepelně ovlivněné oblasti (TOO), mikrostruktura bainitická, vzorek č.1 (135/PC), (zvětšeno 50x)



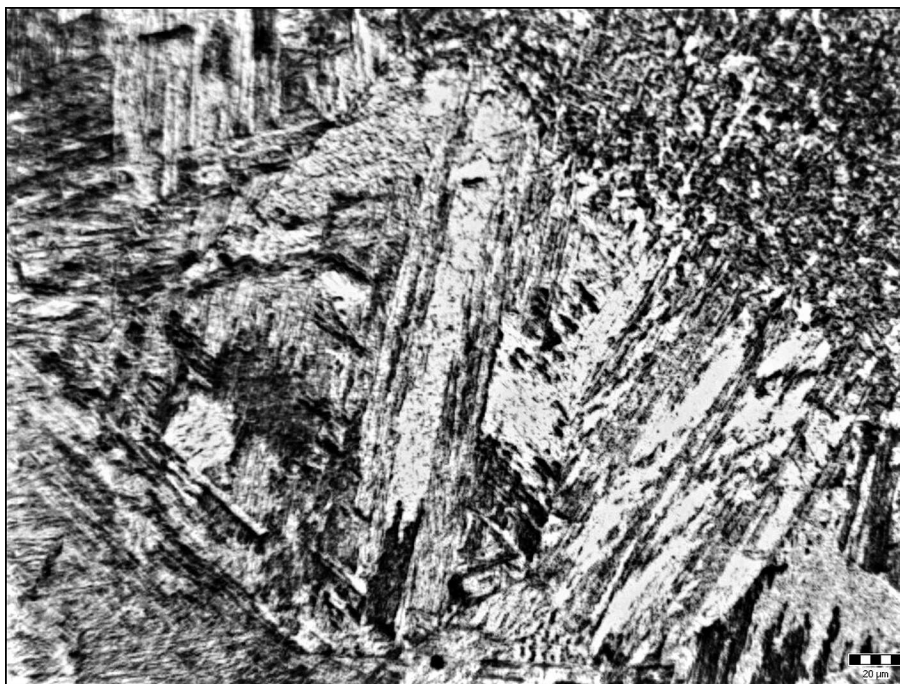
Obr. 20. Mikrostruktura svarový kov – hranice ztavení – pásmo přehřátí, hrubé zrno, mikrostruktura bainitická vzorek č.1 (135/PC), (zvětšeno 100x)



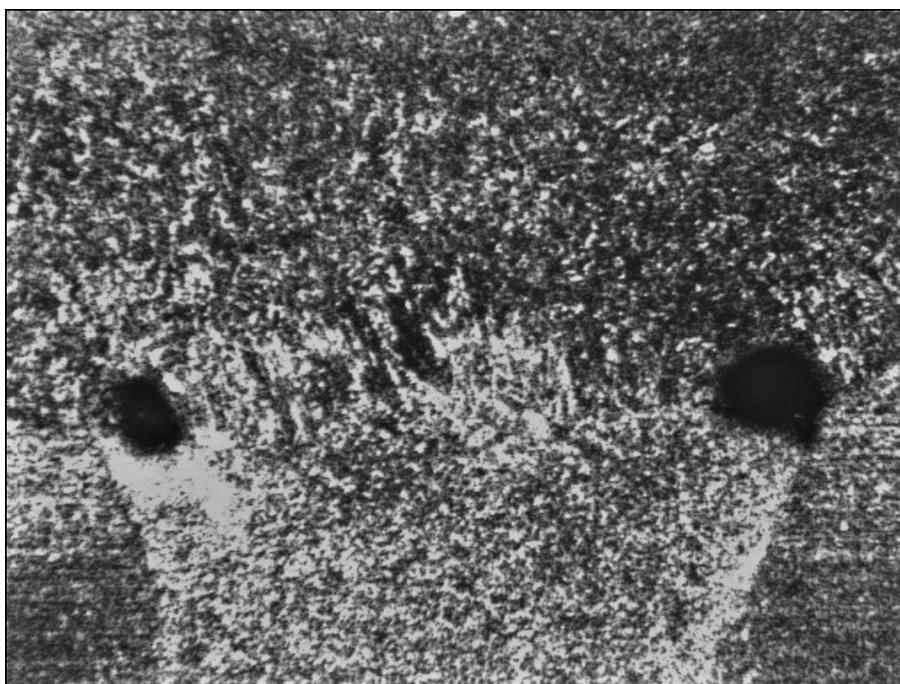
Obr. 21. Mikrostruktura pásem $AC_3 - AC_1$ – základní materiál, mikrostruktura bainitická, vzorek č.1 (135/PC), (zvětšeno 100x)



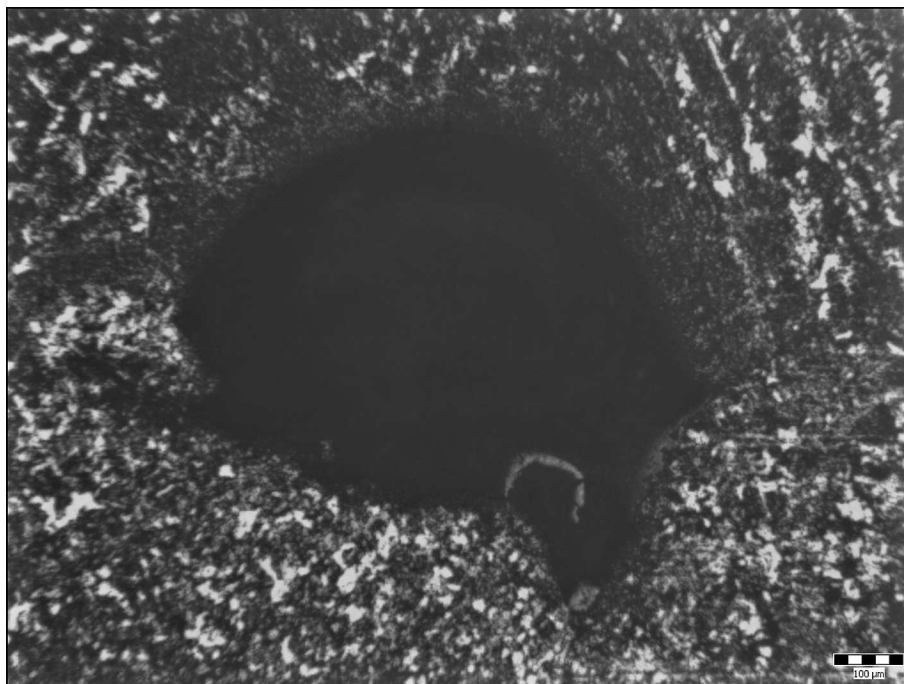
Obr. 22. Mikrostruktura pásem $AC_3 - AC_1$ – základní materiál, mikrostruktura bainitická, bainitické desky, vzorek č.1 (135/PC), (zvětšeno 200x)



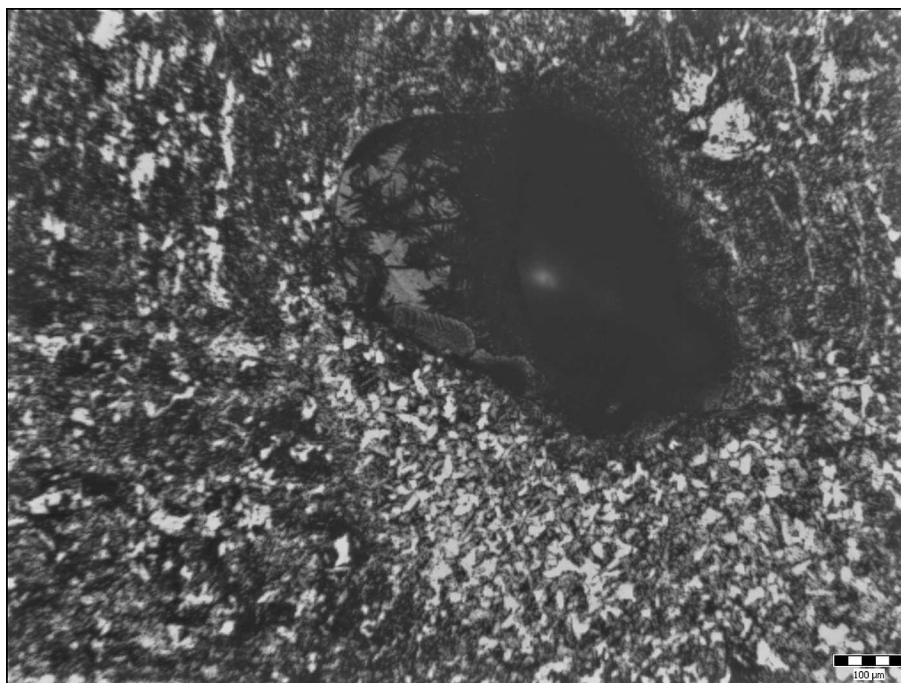
Obr. 23. Mikrostruktura pásma normalizace – mikrostruktura bainitická, bainitické desky, vzorek č.2 (111/PC), (zvětšeno 200x)



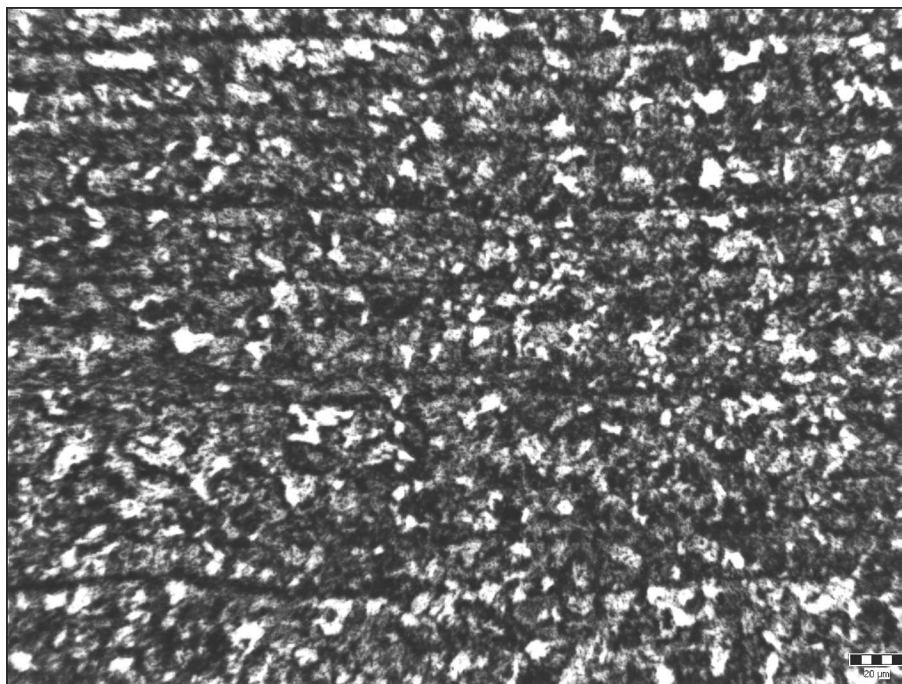
Obr. 24. Makropohled mikrostruktury – vady svařování – póry, vzorek č.3 (135/PF), (zvětšeno 10x)



Obr. 25. Makropohled vady svařování – pór č.1, vzorek č.3 (135/PF), (zvětšeno 50x)



Obr. 26. Makropohled vady svařování – pór č.2, vzorek č.3 (135/PF), (zvětšeno 50x)



Obr. 27. Mikrostruktura pásma normalizace, mikrostruktura bainitická, vzorek č.4
(111/PF), (zvětšeno 100x)

6 DISKUZE VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK

Svařovaný materiál Hardox 450 tl. 12 mm byl svařen metodami svařování 135 - obloukovým svařováním tavící se elektrodou v aktivním plynu a 111 – obloukovým svařováním obalenou elektrodou. Hodnotila jsem mechanické vlastnosti tupého V spoje, pro tuto úpravu svarových ploch byl plech svařen v polohách PF (svislá nahoru) a PC (vodorovná).

Svarové spoje byly podrobeny nedestruktivním zkouškám. Vizuální kontrola splnila požadavek stupně jakosti B dle předpisu ČSN EN ISO 5817, zkouška kapilární splnila požadavek stupně přípustnosti 2x dle předpisu ČSN EN 1289 a zkouška prozářením splnila stupeň přípustnosti 1 dle prováděcího předpisu ČSN EN 12517 (viz. tab. 37 a tab. 38).

Svarové spoje byly dále podrobeny destruktivním zkouškám. Příčná zkouška tahem byla provedena dle ČSN EN 895, požadavek meze pevnosti R_m min. 500 MPa ve svaru byl splněn. Při zkoušce lámavosti vzorky vyhověly při ohybu přes průměr trnu 4.t a úhlu ohybu 180° s trhlinami 1,0 mm a 1,5 mm a 2,9 mm, které jsou dle normy ČSN EN 910 vyhovující do 3 mm. Při zkoušce rázem v ohybu se testovala vrubová houževnatost ve dvou oblastech svaru, a to v oblasti VWT 0/2 – Charpy V vrub, vrub ve svarovém kovu, referenční linie je v ose svaru a v oblasti VHT 2/2 – Charpy V vrub, vrub v TOO, referenční linií je linie natavení (viz. obr. 11 a obr. 12). Minimální požadovaná nárazová práce byla stanovena dle normy ČSN EN ISO 15614-1 na min. 27J, u všech vzorků byla tato hodnota překročena a požadavek byl splněn.

Svarové spoje byly podrobeny další destruktivní zkoušce tvrdosti. Vpichy byly prováděny dle obr. 13. Tvrdost byla měřena v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a ve svarovém kovu. Všechny hodnoty byly zapsány do tabulek a vyneseny do grafů závislostí tvrdostí HV10 na pořadí vpichů. Naměřené hodnoty tvrdostí byly proměnlivé a dle normy ČSN EN ISO 15614-1 překročily požadavek tvrdosti max. 380 HV10 jen u vzorku č.1 (135/PC) v tepelně ovlivněné oblasti v linii 1 (viz. Graf 1). Překročení hodnot tvrdostí bylo způsobeno zvolením nízké teploty předehřevu, která byla volena dle doporučení výrobce (viz. tab. 30). Pro metodu svařování 135 proto musí být předehřev zvolen vyšší, a to min. 150°C podle výpočtu dle normy ČSN EN 1011-2 (viz. kap. 4.2. Předehřev při svařování).

Zkouška makrostruktury byla provedena na čtyřech vzorcích. Makrostruktura byla naleptána 10% vodním roztokem HNO_3 . U vzorků č. 1, č. 2 a č. 4 nebyly identifikovány žádné vady svarového spoje dle požadavku normy ČSN EN ISO 5817 (viz. tab. 50). U vzorku č. 3 byly identifikovány vady svarového spoje – póry, které byly vyhodnoceny jako vyhovující dle požadavku normy ČSN EN ISO 5817 (viz. tab. 52).

Mikrostruktura byla naleptána pomocí přípravku „Vilella“ a vyfocena. Byly vyfoceny všechny oblasti svarového spoje a to svarový kov, TOO a základní materiál. V těchto oblastech byla zjištěna výsledná struktura jako bainitická, s výskytem bainitických desek, svarový kov měl mikrostrukturu feritu + karbidy, bez výskytu žádných nevyhovujících struktur (např. martenzit). Tyto výsledky potvrzují, že daná ocel je vhodná ke svařování danými metodami v daných podmínkách.

7 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést studii svařitelnosti vysokopevnostních jemnozrnných mikrolegovaných ocelí. V úvodu práce se zabývám základními druhy vysokopevnostních ocelí a jejich svařitelností. Navrhla jsem vhodné metody svařování, přídavné materiály, parametry svařování a tepelné zpracování po svařování pro tyto oceli. V experimentální části práce jsem ověřila správnost použitých metod svařování a přídavných materiálů pro zvolený materiál s obchodním označením Hardox 450 tloušťky 2 mm. Na vzorcích byly provedeny destruktivní a nedestruktivní zkoušky, které byly vyhodnoceny u metody svařování 111 jako vyhovující, což znamená, že byly použity vhodné svařovací parametry, teplota přehřevu a teplota interpass. U metody 135 také jako vyhovující, ale s výskytem vad na vzorku č.3 (135/PF) – pórů, které však splňovaly požadavek stupně jakosti B dle normy ČSN EN ISO 5817.

Výsledky mé diplomové práce tedy potvrzují, že tato ocel je vhodná pro svařování metodou 111 a 135 se zvolenými přídavnými materiály a parametry svařování při zvýšení teploty přehřevu u metody svařování 135.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KUČERA, J. *Teorie svařování I.*, 2. vyd. VŠB-TU Ostrava 1991. 408 s. Signatura: 220491
- [2] Prof. Ing. VÁCLAV PILOUS, DRSc. A KOLEKTIV. Vysokopevné mikrolegované jemnozrnné oceli a jejich svařitelnost. Plzeň 1999
- [3] KUČERA, J. *Teorie svařování II.*, 2.vyd. VŠB-TU Ostrava 1991. 305 s. Signatura: 220491
- [4] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I.* 1. vyd. VŠB-TU Ostrava 2005. 136 s. Signatura: 2182
- [5] KOUKAL, J; SCHWARZ, D; HAJDÍK J. *Materiály a jejich svařitelnost.* 1 vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o., VŠB-Technická Univerzita, 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.
- [6] URL: <www.esab.cz>.[citováno 20. prosince 2009]
- [7] URL:<<http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008061801>>.[citováno 11. ledna 2009]
- [8] ČSN EN 10002-1. Zkouška tahem – Část 1. Zkušební metoda za okolní teploty, Praha, ČNI, 2002
- [9] ČSN EN 895. Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem, Praha, ČNI, 1997
- [10] ČSN EN 10045-1. Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho – Část 1: Zkušební metoda (V a U vrub), Praha, ČNI, 1998
- [11] ČSN EN 875. Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Zkouška rázem v ohybu – Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení, Praha, ČNI,

1998

- [12] ČSN EN 910. Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušky lámavosti, Praha, ČNI, 1998
- [13] ČSN EN 1043-1. Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním, Praha, ČNI, 1998
- [14] ČSN EN ISO 15614-1. Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu, Praha, ČNI, 2005